

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Davor Cesarec

Zagreb, 2014.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Ivan Juraga

Davor Cesarec

Zagreb, 2014.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 19-09-2014 Prilog
Klasa: 602-04/14-6/2
Ur.broj: 15-1703-14-369

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Davor Cesarec

Mat. br.: 0035171453

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

ZAŠTITA VJETROTURBINA PREMAZIMA

Naslov rada na
engleskom jeziku:

WIND TURBINE COATINGS PROTECTION

Opis zadatka:

Primjena obnovljivih izvora energije u svijetu je danas u sve većem porastu, zbog čega gradnja vjetroelektrana na kopnu i moru također ubrzano raste. Sa stajališta projektiranja i proizvodnje vjetroturbine predstavljaju izuzetno kompleksne inženjerske konstrukcije koje moraju zadovoljiti i najsloženije uvjete eksploatacije. Od vjetroturbina se zahtjeva dugi niz godina rada uz što manje održavanje, koje je posebno skupo kod vjetroelektrana instaliranih na moru.

U radu je potrebno ukratko opisati vrste vjetroelektrana, njihove dijelove i područja instalacije. Izučiti literaturu, obraditi i na prikladan način prikazati problematiku korozije i zaštite od korozije vjetroturbina. Detaljnije obraditi sustave premaza za zaštitu od korozije vjetroelektrana na moru, prikazati zahtjeve koji se postavljaju pred sustave premaza ovisno o dijelu vjetroturbine, njihovu namjenu i debljinu. Dati prikaz sustava zaštite premazima od temelja do vrha gondole vjetroturbine.

Kroz studije slučaja prikazati probleme zaštite od korozije premazima na instaliranim vjetroelektranama na moru i dati smjernice razvoja novih sustava zaštite od korozije.

Zadatak zadan:

11. studenog 2013.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivan Juraga

Rok predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2014.

2. rok: 12. rujna 2014.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 3., 4. i 5. ožujka 2014.

2. rok: 22., 23. i 24. rujna 2014.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Davor Cesarec

SAŽETAK:

Rad obrađuje poglavlja o obnovljivim izvorima energije, trendove koji prate obnovljivi izvori energije u svijetu i ekonomsko značenje obnovljivih izvora energije. Opisane su vjetroelektrane, namjena, vrste, način djelovanja i mjesta eksploatacije. Obrađeni su premazi, sastavni dijelovi premaza, svojstva te mehanizmi zaštite premazima. Prikazana je problematika korozije i načini zaštite od korozije.

Detaljnije je obrađena problematika korozije na vjetroturbinama od temelja do vrha gondole, s konkretnim prikazom i usporedbom nekoliko različitih sustava premaza.

SADRŽAJ:

SAŽETAK:	5
1. UVOD	1
2. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE	2
2.1 Ekonomsko značenje obnovljivih izvora energije	2
2.2 Energija vjetra	3
2.1.1 Iskorištena snaga vjetra	3
3. VJETROELEKTRANE	5
3.1 Vrste vjetroelektrana	5
3.1.1 Kopnene vjetroelektane	5
3.1.2 Priobalne vjetroelektrane	6
3.1.3 Plutajuće vjetroelektrane	6
3.1.4 Visinske vjetroelektrane	7
3.2 Izvedbe vjetroagregata	8
3.2.1 Vjetroagregati s okomitom (vertikalnom) osi	8
3.2.2 Vjetroagregati s vodoravnom (horizontalnom) osi	10
4. KOROZIJA I ZAŠTITA	11
4.1 Korozija	11
4.2 Priprema površine metala	11
4.3 Organski premazi	11
4.3.1 Veziva	12
4.3.2 Pigmenti	12
4.3.3 Otapala	13
4.4 Nanošenje organskih premaza	13
4.4.1 Nanošenje premaza	13
4.4.2. Sušenje	14
4.5 Mehanizmi zaštite čelika premazima	15

4.5.1. Barijerna zaštita.....	15
4.5.2. Inhibirajuća zaštita.....	16
5. ZAŠTITA OD KOROZIJE VJETROTURBINA NA MORU (OFFSHORE).....	17
5.1 Eksploatacija vjetroturbina na moru	17
5.2 Korozija vjetroturbina danas i sutra	19
5.2 Odabir sustava premaza	21
5.3 Atmosferska okolina - čelični tornjevi vjetroelektrane.....	24
5.4 Podvodna zona - temeljna konstrukcija.....	26
5.5 Uspješna korozijska zaštita	27
5.6 Neuspjeli slučajevi korozivne zaštite vjetroturbina	28
5.6.1 Specifikacija nedostataka	28
5.6.2 Ljuštenja premaza s galvaniziranih čeličnih površina	29
5.6.3 Ljuštenja završnog sloja	30
5.6.4 Prevelika debljina suhog sloja	31
5.7 Primjena i razvoj novih sustava zaštite od korozije	32
6. ZAKLJUČAK.....	34
7. LITERATURA	35

POPIS SLIKA:

Slika 1. Vjetroelektrana na kopnu [3]	5
Slika 2. Priobalne vjetroelektrane (offshore) [4]	6
Slika 3. Plutajuće vjetroelektrane na moru [4]	7
Slika 4. Visinske vjetroelektrane [4]	8
Slika 5. Vjetroturbina s okomitom osi [4]	10
Slika 6. Vjetroturbina s horizontalnom osi [4]	10
Slika 7. Sustav zaštite čelika na osnovi nepropusnosti [6]	14
Slika 8. Barijerna zaštita s pigmentima; a) film s kuglastim pigmentima, b) film s lamelarnim pigmentima [9]	16
Slika 9. Korozija na vjetroturbini [13]	18
Slika 10. Korozija vjetroturbine u zoni valova [11]	18
Slika 11. Oštećenje konstrukcije u zoni valova [12]	20
Slika 12. Prikaz vjetroturbine od temelja do gondole, [12]	21
Slika 13. Mehanička oštećenja u zoni valova nastala od plutajućih predmeta [12] ...	22
Slika 14. Čelični tornjevi vjetroturbina [16]	24
Slika 15. Priprema rubova konstrukcijskih dijelova vjetroturbina [17]	27
Slika 16. Priprema zavora konstrukcije vjetroelektrane za aplikaciju boje [17]	28
Slika 17. Bubrenje na površini [16]	29
Slika 18. Odvajanje završnog premaza na dijelu konstrukcije za pristajanje brodova [16]	31
Slika 19. Nastala pukotina premaza [16]	32

POPIS TABLICA:

Tablica 1. Primjenjeni sustavi zaštite ovisno o dijelu vjetroturbine [15].....	19
Tablica 2. Preporuka premaza za atmosfersko izlaganje vjetroturbine [17].....	22
Tablica 3. Preporuka premaza za podvodnu zonu i zonu valova [17].....	23
Tablica 4. Primjer sustava premaza, Sustav (1) [16]	25
Tablica 5. Primjer sustava premaza, Sustav (2) [16]	25
Tablica 6. Primjer sustava premaza, Sustav (3) [16]	26
Tablica 7. Primjer sustava premaza, Sustav (4) [16]	26

1. UVOD

Novi obnovljivi izvori energije poput energije Sunca, energije vjetra, geotermalne energije na tržištu gospodarenja energijom zauzimaju jako mali udio. Taj udio u budućnosti treba znatno povećati jer neobnovljivih izvora energije ima sve manje, a i njihov štetni utjecaj sve je izraženiji u zadnjih nekoliko desetljeća. Nekoliko tehnologija, osobito energija vjetra, male hidrocentrale, energija iz biomase i sunčeva energija su ekonomski konkurentne. Veliki udio u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora rezultat je ekološke osviještenosti stanovništva, koje usprkos početnoj ekonomskoj neisplativosti instalira postrojenja za proizvodnju "čiste" energije.

Iskorištavanje vjetra putem vjetrenjača je jedan od popularnijih načina iskorištavanja zemljine energije, koja se putem vjetra i njegove kinetičke energije, uz pomoć turbine, pretvara u električnu energiju i na taj način predstavlja alternativni i obnovljivi izvor energije. U zadnjih nekoliko godina turbine na vjetar znatno su poboljšane, njihova snaga tj. proizvodnja energije po turbini se je višestruko povećala.

Zbog početne ekonomske neisplativosti, cijena instalacije vjetrenjača po MW dobivene energije je veća od cijene hidroelektrane, no razvojem vjetroturbina i ta razlika će se smanjiti. Planirani vijek trajanja vjetroelektrana je barem 15 godina, a ovisi o različitim uvjetima poput mjesta eksploatacije, načinu održavanja, izloženosti vremenskim i okolišnim uvjetima itd.

Dobre pozicije za instalaciju vjetroelektrana su obale oceana i pučina mora. Pučina se ističe kao najbolja pozicija zbog stalnosti vjetrova, ali uz nedostatak zbog većih troškova transporta energije na kopno ali i agresivnijim okolišnim uvjetima koji za posljedicu imaju veće investicijske troškove za konstrukcijsku izvedbu i korozivnu zaštitu.

Korozija je spontan i prirodan proces trošenja materijala koji je posljedica težnje povratka metala u spojeve u kojima se nalazi u prirodi. Povećana pažnja se pridodaje zaštiti vjetroelektrana na moru, zbog povoljnih uvjeta za nastajanje korozije te štete koju ona nosi.

U ovom radu detaljnije su obrađeni dijelovi vjetroturbina, konfiguracije turbina i okolišni uvjeti koji na njih utječu, načini i sustavi zaštite od korozije, posebno vrste premaza, namjena premaza, debljine premaza.

2. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

Obnovljive izvore energije možemo podijeliti u dvije glavne kategorije: tradicionalne obnovljive izvore energije poput biomase i velikih hidroelektrana, te na takozvane "nove obnovljive izvore energije" poput energije Sunca, energije vjetra, geotermalne energije itd. Iz obnovljivih izvora energije dobiva se 18% ukupne svjetske energije (2006), ali je većina od toga energija dobivena tradicionalnim iskorištavanjem biomase za kuhanje i grijanje - 13 od 18%. Od velikih hidroelektrana dobiva se dodatnih 3 % energije. Prema tome, kad se izuzme tradicionalne obnovljive izvore energije jednostavno je uračunati da takozvani "novi izvori energije" proizvode samo 2,4% ukupne svjetske energije. 1,3% otpada na instalacije za grijanje vode, 0,8% na proizvodnju električne energije i 0,3% na biogoriva [1]. Taj udio u budućnosti treba znatno povećati jer neobnovljivih izvora energije ima sve manje, a i njihov štetni utjecaj sve je izraženiji u zadnjih nekoliko desetljeća. Sunce isporučuje Zemlji 15 tisuća puta više energije nego što čovječanstvo u sadašnjoj fazi uspijeva potrošiti, ali usprkos tome neki ljudi na Zemlji se smrzavaju. Iz toga se vidi da se obnovljivi izvori mogu i moraju početi bolje iskorištavati. Razvoj obnovljivih izvora energije (osobito od vjetra, vode, sunca i biomase) važan je zbog nekoliko razloga [1]:

- obnovljivi izvori energije imaju vrlo važnu ulogu u smanjenju emisije ugljičnog dioksida (CO_2) u atmosferu. Smanjenje emisije CO_2 u atmosferu je politika u svijetu, Europskoj uniji pa tako i u Hrvatskoj.
- povećanje udjela obnovljivih izvora energije povećava energetske održivosti sustava. Također pomaže u poboljšavanju sigurnosti dostave energije na način da smanjuje ovisnost o uvozu energetskih sirovina i električne energije.
- očekuje se da će obnovljivi izvori energije postati ekonomski konkurentni konvencionalnim izvorima energije.

2.1 Ekonomsko značenje obnovljivih izvora energije

Nekoliko tehnologija, osobito energija vjetra, male hidrocentrale, energija iz biomase i sunčeva energija su ekonomski konkurentne. Ostale tehnologije su ovisne o potražnji na tržištu da bi postale ekonomski isplative u odnosu na klasične izvore energije. Proces prihvaćanja novih tehnologija vrlo je spor i uvijek izgleda kao da izmiče za samo malo.

Glavni problem za instalaciju novih postrojenja je početna cijena. To diže cijenu dobivene energije u prvih nekoliko godina na razinu neisplativosti u odnosu na ostale komercijalno dostupne izvore energije. Veliki udio u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora rezultat je ekološke osviještenosti stanovništva, koje usprkos početnoj ekonomskoj neisplativosti instalira postrojenja za proizvodnju "čiste" energije. Europska zajednica ima strategiju povećati udio obnovljivih izvora energije 20% cjelokupne potrošnje energije u EU do 2020. godine [1].

2.2 Energija vjetra

Budućnost obnovljive energije - vjetroenergije - u Hrvatskoj, jednako kao u svijetu, zajamčena je potrebom država za održivim razvojem, zaštitom okoliša i energetsom učinkovitošću. Iskorištavanje vjetra putem vjetrenjača je jedan od popularnijih načina iskorištavanja zemljine energije, koja se putem vjetra i njegove kinetičke energije, uz pomoć turbine, pretvara u električnu energiju i na taj način predstavlja još jedan alternativni i obnovljivi izvor energije.

Vjetar je u stvari indirektan oblik solarne energije jer do pojave vjetra dolazi zbog razlike u temperaturama između jače zagrijanih dijelova na Zemlji (ekvator) i slabije zagrijanih dijelova (polovi). Temperaturna razlika stvara razliku u tlakovima što uzrokuje pomicanje zračnih masa. Topli zrak zagrijan oko ekvatora diže se u visinu sve do oko 10 km, a istovremeno putuje prema polovima. Kada zemlja ne bi rotirala topao zrak bi jednostavno samo došao do polova, ohladio se, potonuo i krenuo nazad prema ekvatoru. Budući da zemlja rotira na vjetar utječe i Coriolisova sila. Naravno i mikroklima ima svoj utjecaj, posebice u područjima uz more [2].

2.1.1 Iskorištena snaga vjetra

Iskorištavanje energije vjetra je najbrže rastući segment proizvodnje energije iz obnovljivih izvora. U zadnjih nekoliko godina vjetroturbine znatno su poboljšane. Najbolji primjer je njemačko tržište turbina na kojemu se prosječna snaga od 470 kW 1995. godine povećala na 1280 kW 2001. godine. Ovo povećanje snage postiglo se odgovarajućim povećavanjem veličine turbina gonjenih vjetrom. Trenutno su u razvoju turbine koje će moći generirati snagu između 3 i 5 MW. Neki proizvođači već su predstavili svoje prototipove u tom razredu snage (njemačka tvrtka Enercon trebala bi proizvesti turbinu snage 4,5 MW). Za vjetroturbine se koriste izrazi poput vjetroelektrana, vjetrogenerator, električne turbine na vjetar i slično.

Zbog početne ekonomske neisplativosti i nestalnosti vjetra, instalacija vjetroturbina je privilegija koju si mogu priuštiti samo bogate zemlje. Trenutno je cijena vjetroturbine veća od cijene termoelektrane po MW instalirane snage (vjetroturbina košta oko 1000 €/kW instalirane snage, a termoelektrana 700 €/kW), ali razvojem tehnologije ta razlika sve je manja [3].

Njemačka je trenutni lider u proizvodnji električne energije iz vjetra sa 8750 MW, a to je više od jedne trećine ukupno instalirane snage vjetroelektrana u svijetu. Toliko instaliranih vjetroelektrana u Njemačkoj rezultat je politike njemačke vlade koja poticajnim mjerama pomaže instalaciju novih kapaciteta. Zbog toga u 2001. godini ukupno instalirana snaga povećala se za 43,7%. U Španjolskoj, Danskoj i Italiji također raste instalirani kapacitet. Od sveukupne proizvodnje električne energije Danska dobiva 14% od vjetra i dalje ubrzanim tempom gradi nove kapacitete. Namjera Danske je da takvim pristupom do 2030. godine 50% energetske potreba kućanstava zadovolji iskorištavanjem energije vjetra. U SAD-u je trenutno instalirano 6374 MW vjetrenjača. Tako mala instalirana snaga u gospodarski najjačoj zemlji svijeta rezultat je tradicionalnog američkog oslanjanja na fosilna goriva. Povoljan vjetar je onaj koji je umjeren i stalan, a takav je npr. maestral koji puše ljeti s mora prema kopnu [3].

Energija vjetra je transformirani oblik sunčeve energije. Sunce neravnomjerno zagrijava različite dijelove Zemlje i to rezultira različitim tlakovima zraka, a vjetar nastaje zbog težnje za izjednačavanjem tlakova zraka. Postoje dijelovi Zemlje na kojima pušu takozvani stalni (planetarni) vjetrovi i na tim područjima je iskorištavanje energije vjetra najisplativije. Dobre pozicije su obale oceana i pučina mora. Pučina se ističe kao najbolja pozicija zbog stalnosti vjetrova, ali cijene instalacije i transporta energije koče takvu eksploataciju. Kod pretvorbe kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju (okretanje osovine generatora) iskorištava se samo razlika brzine vjetra na ulazu i na izlazu. Kao dobre strane iskorištavanja energije vjetra ističu se visoka pouzdanost rada postrojenja, nema troškova za gorivo i nema zagađivanja okoline. Loše strane su visoki troškovi izgradnje i promjenjivost brzine vjetra (ne može se garantirati isporučivanje energije). Za domaćinstva vrlo su interesantne male vjetroturbine snage do nekoliko desetaka kW. One se mogu koristiti kao dodatni izvor energije ili kao primarni izvor energije u udaljenim područjima. Kad se koriste kao primarni izvor energije nužno im se dodaju baterije (akumulatori) u koje se energija sprema kad se generira više od potrošnje.

Velike vjetroturbine često se instaliraju u park vjetrenjača i preko transformatora spajaju se na električnu mrežu [3].

3. VJETROELEKTRANE

Vjetroeletana je niz blisko smještenih vjetroatregata, najčešće istog tipa, izloženih istom vjetru i priključenih posredstvom zajedničkog rasklopnog uređaja na elektroenergetski sustav. Vjetroturbina je rotirajući stroj koji pretvara kinetičku energiju vjetra prvo u mehaničku, a zatim preko električnih generatora u električnu energiju. Pri tome se rotor vjetroturbine i rotor električnog generatora nalaze na istom vratilu. Vjetroeletana je obnovljivi izvor električne energije pokretan kinetičkom energijom vjetra [4].

3.1 Vrste vjetroelektrana

3.1.1 Kopnene vjetroeletane

Kopnene vjetroeletane se grade na čvrstom tlu i najčešći su oblik vjetroelektrana. Slika 1 prikazuje polje vjetroturbina koje su smještene na kopnu.



Slika 1. Vjetroelektrana na kopnu [3]

3.1.2 Priobalne vjetroeletktrane

Priobalna vjetroeletktrana (eng. *offshore wind park*) je vrsta vjetroeletktrane s čvrstim temeljima koja se gradi na moru (ima planova gradnje i na jezerima), uglavnom u priobalnom području, gdje je dubina vode obično manja od 60 metara (udaljenost od obale do najviše 50 kilometara), za razliku od plutajućih vjetroeletktrana, koje se grade na pučini. Činjenica da voda (a posebice duboka voda) ima manju površinsku "hrapavost" od kopna jako utječe na brzine vjetra, koje su mnogo veće na moru. Faktori snage su mnogo veći kod takvih instalacija. Kod lokacija s produženim plićinama (kao primjerice u Danskoj), vjetroeletktrane je lako sagraditi. Općenito govoreći, morske instalacije vjetroatregata su načelno skuplje od kopnenih. To je zbog toga što su im tornjevi viši kada se uračuna dio ispod vode i što je sama izgradnja skuplja. Proizvedena električna energija se do kopna prenosi putem podmorskog kabela. Održavanje je također skuplje, a mora se paziti i na zaštitu od korozije, zbog čega se često dodaju dodatni premazi i katodna zaštita. Takve turbine su najveće turbine u pogonu i predviđa se da će njihova veličina (i instalirana snaga) i dalje rasti (preko 6 MW). Vjetroeletktrane smještene na moru znaju imati i više od 100 vjetroatregata (slika 2) [4].



Slika 2. Priobalne vjetroeletktrane (offshore) [4]

3.1.3 Plutajuće vjetroeletktrane

Plutajuća vjetroeletktrana ili pučinska vjetroeletktrana je vrsta vjetroeletktrane koja se postavlja na plutajuću strukturu u dubljem moru, gdje nije moguće postaviti priobalnu vjetroeletktranu. Plutajuće vjetroeletktrane su složene i zahtijevaju veće

početne troškove, ali su nove studije pokazale je da zbog njihovih mogućnosti da pristupe snažnijim vjetrovima dalje na moru imaju isplativost primjene.

Obično se više plutajućih vjetroagregata povezuju zajedno u vjetroelektranu, kako bi se koristio zajednički podvodni kabel za prijenos električne struje (slika 3) [4].



Slika 3. Plutajuće vjetroelektrane na moru [4]

3.1.4 Visinske vjetroelektrane

Koncept visinskih vjetroelektrana se zasniva na iskorištenju energije vjetra u višim slojevima atmosfere (slika 4). One predstavljaju dizajnirani koncept vjetroelektrana koji su na različite načine podignuti u visinu bez potpore tornja. Možemo ih podijeliti u dvije skupine: one za iskorištavanje vjetra na nižim visinama te na one koje to mogu na višim visinama. Tijekom posljednjih 20 godina napravljeno je nekoliko desetaka projekata i koncepata od kojih se istaknula nekolicina koje imaju šanse za realizaciju. Zajedničko im je to što su predviđene za iskorištavanje vjetra na visinama većim nego što to mogu vjetroelektrane montirane na tlu, mogućnost montaže na bilo kojoj lokaciji na svijetu te su u potpunosti ekološki prihvatljive, budući da ne ispuštaju stakleničke plinove. Visinske vjetroelektrane na taj način mogu proizvoditi električnu energiju 90% vremena, dok bi one na zemlji to činile maksimalno 35% vremena. To bi rezultiralo pojeftinjenjem električne energije i zahtjevalo bi manje vjetroelektrana za istu količinu električne energije [4].



Slika 4. Visinske vjetroelektrane [4]

3.2 Izvedbe vjetroatregata

3.2.1 Vjetroatregati s okomitom (vertikalnom) osi

Vjetroatregati s okomitom (vertikalnom) osi su najstariji sustavi za iskorištavanje energije vjetra. Danas također postoje koncepti modernih vjetroatregata koji imaju okomit položaj osi. Negativna strana ove vrste vjetroatregata je manja iskoristivost od vjetroatregata s horizontalnom osi, a pozitivne strane su [3, 4]:

- vjetroatregat nema usmjerenja što znači da ne trebaju dodatni uređaji za praćenje vjetra i okretanje vjetroturbine;
- potreban je slabiji vjetar za njihov rad;
- uređaji za kontrolu vjetroatregata i pretvorbu energije mogu biti smješteni na razini zemlje zbog okomite osi rotora;
- jednostavnija struktura što olakšava i samo postavljanje.

Vrste vjetroagregata s vertikalnom osi su [3, 4]:

- Savoniusov rotor,
- Darrieusov rotor,
- H rotor,
- vjetrenjača s rotirajućim jedrima.

Savoniusov rotor radi na principu otpornog djelovanja koji kombinira sa potiskom. Sastoji se od dvaju polucilindričnih lopatica koje su otvorene na suprotnim stranama. Blizu osi, lopatice se preklapaju tako da preusmjereni vjetar može strujati iz jedne lopatice u drugu. Ova vrsta rotora ima veću iskoristivost od rotora baziranih samo na otpornom djelovanju, ali manju od rotora primarno baziranih na potisku. Ovaj tip rotora ima prednost koja se bazira na tome da se mogu početi vrtjeti na malim brzinama vjetra, dok im je loša strana u tome što je potrebno puno materijala za njihovu izradu.

Darrieusov rotor je 1929. konstruirao Francuz Georges Darrieus. Ova vrsta rotora se sastoji od dvije ili tri lopatice koje imaju oblik parabole. Profil rotorskih lopatica oblikom odgovara radu na principu potiska. Iskoristivost ovih rotora je puno veća od iskoristivosti Savonius-ovih rotora. Glavni nedostatak Darrieus-ovog rotora je u tome što ne može sam započeti rotaciju te zbog toga uvijek zahtjeva pomoćni uređaj za pokretanje.

Daljnjim razvojem Darrieusovog rotora razvijen je H rotor ili H – Darrieus-ov rotor. Ovaj rotor se još naziva i Heidelberg rotor po tvrtki *Heidelberg Motor*. Generator sa permanentnim magnetom je integriran u samu strukturu rotora i ne zahtjeva sustav prijenosa [3, 4]. Na slici 5 je prikazan vjetroagregat s okomitom osi.



Slika 5. Vjetroturbina s okomitom osi [4]

3.2.2 Vjetroatregati s vodoravnom (horizontalnom) osi

Vjetroatregati s vodoravnom (horizontalnom) osi su danas najzastupljeniji tip vjetroturbina (slika 5). Vjetroatregati su došli do vrlo visokog stupnja tehničke razvijenosti i dosežu snage od nekoliko megawata, dok su vjetroatregati u 1980-tim godinama bili u rang snage ispod 100 kW [3, 4].



Slika 6. Vjetroturbina s horizontalnom osi [4]

4. KOROZIJA I ZAŠTITA

4.1 Korozija

Koroziju se definira kao nepoželjno ili nenamjerno trošenje materijala, zato što je korozija spontan proces koji je posljedica težnje povratka metala u spojeve u kojima se nalazi u prirodi, a to su rude i minerali. Da bi se rude ili prirodni spojevi preradili u metal moraju se podvrgnuti metalurškim procesima koji zahtijevaju unos energije. Pri tomu je metalno stanje ono koje sadrži visoku energiju. Prirodna težnja metala je da reagiraju s drugim tvarima i oslobađanjem energije prelaze u stanja niže energije. To smanjivanje slobodne energije je pokretačka sila procesa korozije [5].

4.2 Priprema površine metala

Preduvjet za kvalitetno prevlačenje metalnog predmeta je dobra priprema njegove površine. Prije svake zaštite potrebno je s površine ukloniti nečistoće kao produkte korozije, okujine, masnoće i dr. Nečistoće se uklanjaju postupcima čiji karakter i redoslijed ovise o stupnju onečišćenja, vrsti prevlake i željenom izgledu površina.

Postupci pripreme površine prije zaštitnog prevlačenja jesu [5]:

- mehanički,
- kemijski,
- elektrokemijski,
- odmašćivanje,

4.3 Organski premazi

Zaštita metalnih površina organskim prevlakama jedan je od najrasprostranjenijih postupaka u tehnici. Čak $\frac{3}{4}$ ukupnih metalnih površina zaštićeno je organskim prevlakama.

Organskim se prevlakama smatraju sve one koje čini kompaktnima organska tvar tvorbom opne. Takvi se slojevi dobiju nanošenjem organskih premazanih sredstava (bojanjem i lakiranjem), uobičajenim podmazivanjem plastifikacijom (prevlačenjem plastičnim masama), gumiranjem i bitumenizacijom. Izraz boje i lakovi rabe se za premazna sredstva i za gotove prevlake nastale njihovim sušenjem.

Prvi se nanosi temeljni premaz koji direktno dolazi na površinu metala i mora dobro prijanjati uz metal i pružiti aktivnu zaštitu od korozije.

Stoga se temeljnim bojama dodaju specijalni pigmenti kao npr. cink u prahu. Pokrivni premaz se nanosi preko temeljnog premaza i stvara sloj koji će štititi temeljni sloj od agresivnog djelovanja okoline, te dati predmetu ljepši izgled. Temeljni i pokrivni premaz čine jedinstven zaštitni sustav pa je potrebno da se međusobno vežu. Prevlaka mora biti nepropusna, tvrda, elastična, otporna na kemijske agense, treba prijanjati uz podlogu, te mora biti izolator električne struje [5].

4.3.1 Veziva

Veziva su organske tvari u tekućem ili praškastom stanju koje povezuju sve komponente premaznog sredstva, a nakon nanošenja stvaraju tvrdi zaštitni sloj. U određenom premaznom sredstvu često se kombiniraju različita veziva, kako bi se postigla željena svojstva premaza. Valja istaknuti da se vezivo premaznog sredstva bitno razlikuje od tvari koja čine opnu prevlake ako ona nastaje kemijskim otvrdnjivanjem. Važna se veziva na osnovi sušivih masnih ulja, poliplasta, derivata celuloze, prirodnih smola, prirodnog ili sintetičkog kaučuka i bituminoznih tvari. Najraširenija su poliplastična veziva alkidne smole, poliesteri viševalentnih alkohola (npr. glicerola i pentaeritriola) i dvovalentnih karbonskih kiselina [5].

4.3.2 Pigmenti

Pigmenti su prirodne ili umjetne praškaste tvari najčešće anorganskog porijekla, koje se ne otapaju u vezivu i zaštitnom sloju daju boju. Uloga pigmenata je da premaze učine neprozirnim, da povećaju mehanička i zaštitna svojstva premaza, te njihovu kemijsku i termičku postojanost i da poboljšaju refleksiju svjetlosti, a time smanjenje zagrijavanja i fotodestrukciju. Zaštitno djelovanje pigmenata može biti pasivizirajuće (pigmenti oksidirajućih svojstava koji na metalnoj površini stvaraju pasivni oksidi sloj, takvo djelovanje na željezo imaju olovni minij i olovni kromat), inhibitorsko (djelovanje se temelji na reakciji između pigmenata i veziva ili između pigmenata i okoline pri čemu nastaje inhibitor korozije), neutralizirajući (temelji se na lužnatim svojstvima pigmenata koji neutraliziraju kiselinu iz okoline) i djelovanje katodnom zaštitom (omogućuju samo metalni pigmenti čiji je elektrodi potencijal negativniji od potencijala metala koji se štiti). Jeftini pigmenti zovu se punilima.

Također to su praškaste tvari anorganskog podrijetla koje smanjuju poroznost, ali i cijenu finalnom proizvodu.

Služe i za postizanje boljih optičkih i mehaničkih svojstava (sjaj, čvrstoća, prianjanje, otpornost na trošenje i sl.). Najpoznatija punila su barit, kreda i silikati [5].

4.3.3 Otapala

Otapala (razrjeđivači) su organski spojevi u kojima se vezivo otapa, ali pritom ne dolazi do kemijskih promjena. Upotrebljavaju se za postizanje određene viskoznosti zaštitnih sredstava, tako da se ona mogu lako nanjeti na metalnu površinu. Najznačajnija su otapala neki aromatski i alifatski ugljikovodici (toluen, ksilen, benzini) i jeftini alkoholi. Nakon nanošenja premaznog sredstva na podlogu, otapala isparavaju, a nanese sloj na podlozi skrućuje stvarajući čvrstu prevlaku. Pri izboru otapala treba imati u vidu pravilo „slično se otapa sličnim“. Primjena neodgovarajućih otapala ima za posljedicu dobivanje nekvalitetnih premaza [5].

4.4 Nanošenje organskih premaza

4.4.1 Nanošenje premaza

Temeljni premaz potrebno je nanijeti odmah nakon pripreme površine, po mogućnosti još istog dana kada je priprema provedena. Nanošenje premaza na podlogu redovito se obavlja višeslojno uz djelomično ili potpuno sušenje prethodnog sloja. Veziva slojeva koji se dodiruju moraju biti istovrsna ili kompatibilna, a također je nužna kompatibilnost između podloge i temeljnog sloja. Zbog toga se preporuča cijeli premazni sustav izvesti sredstvima istog proizvođača.

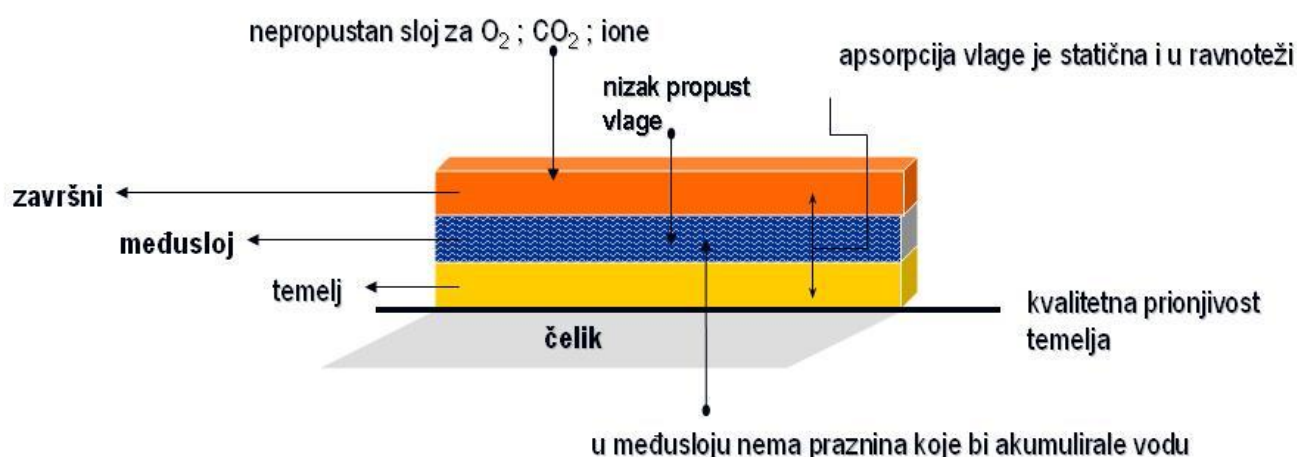
Zaštitni sloj sastoji se od temeljnog sloja, jednog ili više međuslojeva i završnog sloja, od kojih svaki sloj ima svoju funkciju.

Temeljni premaz je prvi sloj koji je nanesen na metalnu površinu. Osnovna mu je funkcija osiguranje dobre prionjivosti između premaza i podloge. Ako temeljni premaz ne prianja dobro na podlogu, narušena je funkcionalnost cijelog premaznog sustava. Priprema površine pomaže dobroj prionjivosti uklanjajući razne nečistoće i osiguravajući traženu hrapavost, odnosno glatkoću. Mnogi temeljni premazi za zaštitu čelika sadrže antikorozivne inhibirajuće ili inertne pigmente čime se zaštita od korozije dodatno pojačava [6].

Međuslojni premaz u sustavu pojačava zaštitna svojstva premaza stvarajući barijerni efekt. Osnovno svojstvo mu je kompatibilnost sa završnim i temeljnim slojem. Često se koristi kada temeljni i završni sloj nisu međusobno kompatibilni. Broj međuslojeva ovisi o željenoj debljini suhog filma.

Naime, međusloj je obično jeftiniji od temeljnog i završnog sloja pa se debljina između ostalog podešava i brojem međuslojeva. Na slici 7 prikazan je sustav zaštite premazom čelika.

Završni premaz poboljšava površinsku otpornost sustava zaštite od korozije premazima, te njegova mehanička i fizikalna svojstva. Osigurava ispunjenje zahtjeva za određenim nijansama, sjajem, glatkoćom [6].



Slika 7. Sustav zaštite čelika na osnovi nepropusnosti [6]

Premazi se mogu na metalnu podlogu nanositi na više načina: kistom, valjkom i štrcanjem koje može biti bezračno, zračno, elektrostatsko. Izbor adekvatnog postupka nanošenja utječe na prionjivost, kako na podlogu tako i na prijanjanje među slojevima, debljinu filma, a i na brzinu rada, kvalitetu i ekonomičnost rada [6].

4.4.2. Sušenje

Stvoreni film na podlozi suši se fizikalno ili kemijski. Kemijski sušivi premazi dijele se na one koji se suše pri sobnoj temperaturi i na one koji se suše pri povišenim temperaturama. Sam način sušenja ovisi o sastavu premaza.

Od suhog premaza očekuje se [6]:

- prionjivost na podlogu,
- otpornost na trošenje, na mehaničke uvjete, na vremenske utjecaje,
- elastičnost,
- nepropustljivost za korozijske čimbenike,
- aktivno antikorozijsko djelovanje,
- kemijska inertnost,
- kompaktnost,
- dekorativnost.

4.5 Mehanizmi zaštite čelika premazima

Čelik je široko upotrebljiv tehnički materijal u proizvodnji i primjeni. Dolazi u različitim oblicima i sastavu, a koristi se za izgradnju mostova, dijelova vjetroturbina, namještaja, kućnih pomagala itd. Svjetska proizvodnja iznosi više od 900 milijuna tona, što je više od 50 % od ukupne proizvodnje svih tehničkih materijala. Primat u primjeni čelicima daje dobra kombinacija svojstava-čvrstoće, žilavosti, rezljivosti, spojivosti, oblikovljivosti deformacijom, mogućnost promjene svojstava legiranjem, toplinskom obradom, oblikovljivosti deformiranjem te relativno niska cijena. Međutim, čelik je podložen koroziji. Zaštita čelika premazima zasniva se na tri mehanizma: barijerna zaštita, inhibirajuća zaštita i katodna zaštita [7].

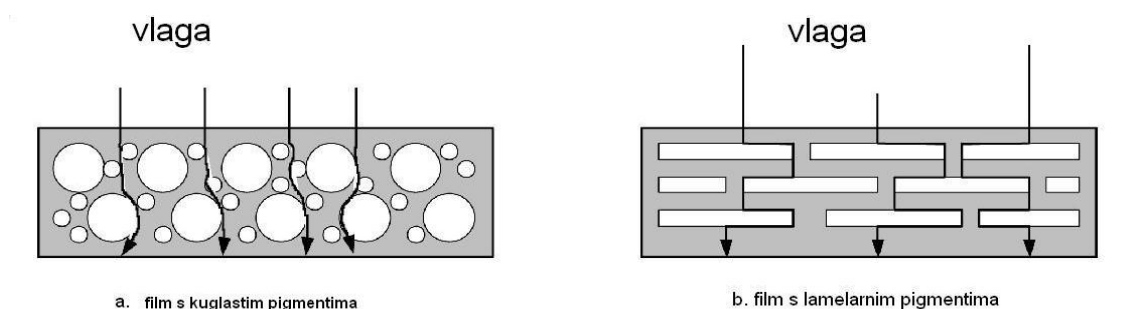
4.5.1. Barijerna zaštita

Barijernom zaštitom premaza, čelik se štiti stvaranjem filma na njegovoj površini. Suhi film sprječava kisik i vlagu da dođu u kontakt sa čelikom. Bez kisika nema oksidacije čelika. Osim kisika iz zraka oksidaciju čelika uzrokuje i kisik iz vlage koja je inače elektrolit. Međutim, nijedan premaz nije potpuno nepropustan prema vlazi i kisiku pa i vlaga i kisik difundiraju u premaz, ali do određene razine. Difuzija kisika i tekućina kroz materijal bez fizikalnog ili kemijskog utjecaja na njega naziva se permeabilnost. Premazi koji zaštićuju čelik stvaranjem barijere imaju niski otpor difuziji vlage.

Tipični premazi koji štite čelik barijernom zaštitom su epoksi boje, vinilne boje, klorkaučuk boje, poliuretanski premazi i boje s bitumenom kao vezivom. Barijerna

zaštita premaza može se poboljšati dodatkom posebnih lamelarnih pigmenata u sastav premaza.

Lamelarni pigmenti orijentirani su paralelno s površinom čelika, tako da vlaga ima duži i kompliciraniji prolaz oko pigmenata do površine koja se štiti, kao što je prikazano na slici 8 [8].



Slika 8. Barijerna zaštita s pigmentima; a) film s kuglastim pigmentima, b) film s lamelarnim pigmentima [9]

4.5.2. Inhibirajuća zaštita

Premazi koji štite čelik inhibiranjem korozijskog procesa sadrže posebne pigmente koji koče ionizaciju čelika, tj. anodni dio korozijskog procesa. Tipični antikorozijski pigmenti su olovni i kromatni pigmenti. Međutim, zbog njihove otrovnosti treba ih izbjegavati te se izbacuju iz primjene. U posljednjih nekoliko godina cink-fosfatni pigmenti potpuno su zamijenili kromatne.

Antikorozijski pigmenti dodaju se najčešće uljnim bojama, alkidnim bojama, vodotopivim i vodorazrjedivim bojama, koje nemaju toliku propusnost vlage kao premazi koji štite isključivo stvaranjem barijere [10].

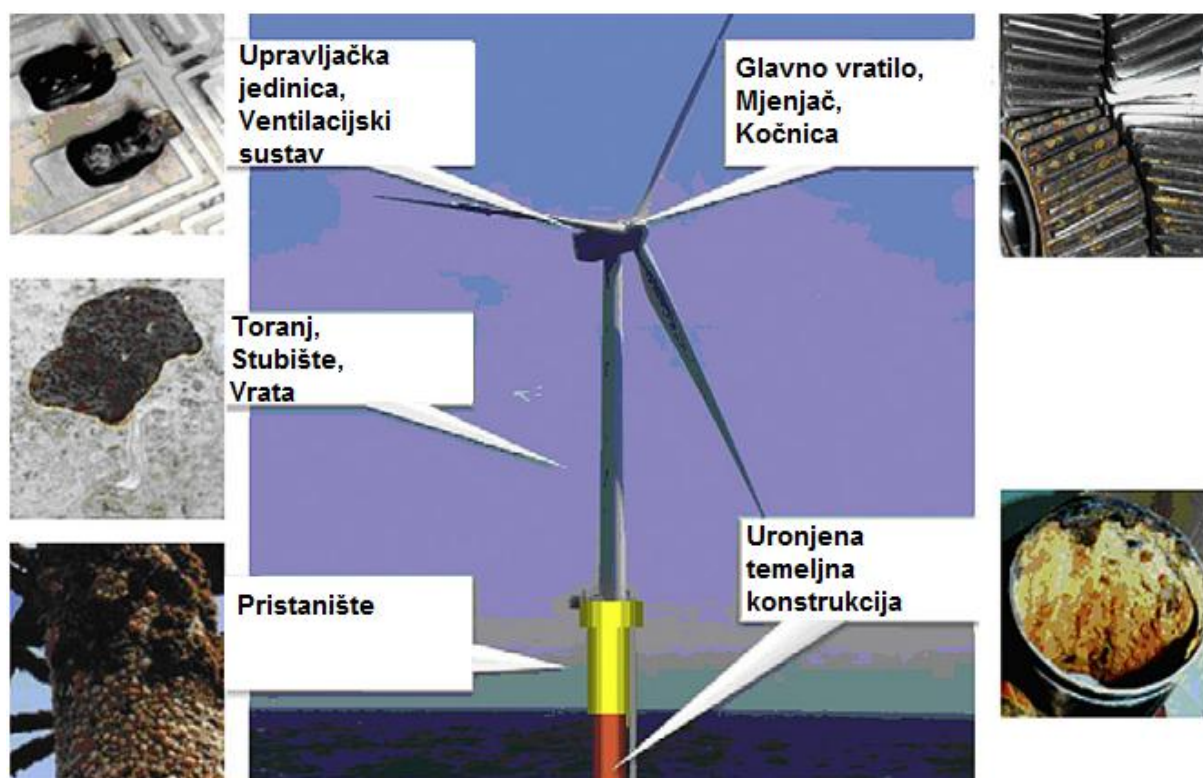
5. ZAŠTITA OD KOROZIJE VJETROTURBINA NA MORU (OFFSHORE)

5.1 Eksploatacija vjetroturbina na moru

Zaštita od korozije je vrlo važan aspekt u zaštiti offshore vjetroturbina od štete uzrokovane korozijom. Neke vrste korozije, štete na vjetroturbini prikazane su na slici 9. Za razliku od nekih drugih objekata kao što su offshore naftne platforme, popravljavanje i održavanje offshore vjetroturbina može biti vrlo teško i skupo. Stoga mjere zaštite od korozije za offshore vjetroturbine trebaju imati obilježja izvrsnog antikorozivnog učinka, jednostavnog načina gradnje, dugoročni životni vijek sa što manje održavanja [14].

Mnoga offshore postrojenja sada su opremljena „antikorozivnim paketom“, u svrhu zaštite od korozije s vanjske i unutarnje strane konstrukcije vjetroturbine. Zaštita od korozije na unutarnjoj strani gondole može se postići održavanjem suhe atmosfere unutar gondole. Kako bi se održali uvjeti suhe atmosfere bez vlage na gondole vjetroturbina ugrađuju se klimatski i ventilacijski uređaji.

Osim toga, neke važne komponente kao npr. električni generator, prijenosnik snage, upravljački uređaj itd. opremljene su sustavom za grijanje kako nebi došlo do pojave kondenzacije uslijed nagle promjene temperature [14]. Slika 9 prikazuje pojavu korozije na dijelovima vjetroturbine od temelja pa do vrha gondole.



Slika 9. Korozija na vjetroturbini [13]

Uzimajući u obzir nastajanje korozije na različitim lokacijama pod različitim okolišnim uvjetima, konstrukciju vjetroturbine je moguće podijeliti na četiri zone: atmosferska zonu, zona valova, uronjenu (podvodnu) zonu i morsko tlo. Zbog morske vode i vlažnog zraka zasićenog solima u zoni valova javlja se najveća opasnost od korozije na tornju vjetroturbine (slika 10) [14].



Slika 10. Korozija vjetroturbine u zoni valova [11]

Metode koje se koriste za zaštitu od korozije na vjetroturbinama eksploatiranim na moru su zaštita premazima, katodna zaštita i zaštita vrućim naštrecavanjem metaliziranog sloja od cinka ili aluminija. U svakoj pojedinoj zoni primjenjuju se različiti sustavi zaštite od korozije, primjer se nalazi u Tablici 1 [15].

Tablica 1. Primjenjeni sustavi zaštite ovisno o dijelu vjetroturbine [15]

Okolina:	Metode zaštite:
Atmosferska zona	Premazi Metalizacija vrućim naštrecavanjem
Zona valova	Premazi Metalizacija vrućim naštrecavanjem
Uronjena zona	Katodna zaštita Premazi
Morsko tlo	Katodna zaštita

Premazi se najčešće primjenjuju kao sustavi zaštite, posebno su bili razvijani za zaštitu od korozije na platformama za crpljenje nafte i plina te se sada primjenjuju za zaštitu vjetroturbina na moru. Katodna zaštita je drugi važan sustav zaštite od korozije. Primjenjuju se dvije vrste katodne zaštite: katodna zaštita žrtvovanim anodama i katodna zaštita vanjskim izvorom struje. Sustav katodne zaštite žrtvovanim anodama koristi anode od cinka ili aluminija. Okolišu prihvatljiviji sustav je sustav s vanjskim izvorom struje, pošto su iskustva pokazala da žrtvovane anode završavaju na morskom dnu [15].

5.2 Korozija vjetroturbina danas i sutra

Osiguranje najviše moguće kvalitete sustava premaza za zaštitu od korozije od izrazite je važnosti za doživotne troškove offshore projekta vjetroturbina. Ako se ispostave rane pogreške u procesu projektiranja sustava premaza za eksploataciju na moru, velika će biti vjerojatnost za dodatnim i višestruko većim troškovima održavanja te popravcima. Analize šteta i neuspjeli slučajevi pokazuju da većina oštećenja nastaje zbog pogrešne pripreme površine ili krive aplikacije premaza [16].

Zaštita od korozije offshore vjetroturbina je u području razvoja budući da je energija vjetra budućnost u dobivanju energije iz obnovljivih izvora. U Europi u gusto naseljenim područjima potpora javnosti za vjetroelektranama je ograničena zbog čega potpora za offshore elektranama raste.

Premazi moraju izdržati i zaštititi konstrukciju od vlage s visokom slanoćom, od izloženosti na UV svjetlu, od naglih promjena temperatura, kao i plimne valove. Slika 11 prikazuje samo jedan primjer oštećenja površine konstrukcije, zaštićene sustavom premaza, koja je izložena raznim okolišnim uvjetima.



Slika 11. Oštećenje konstrukcije u zoni valova [12]

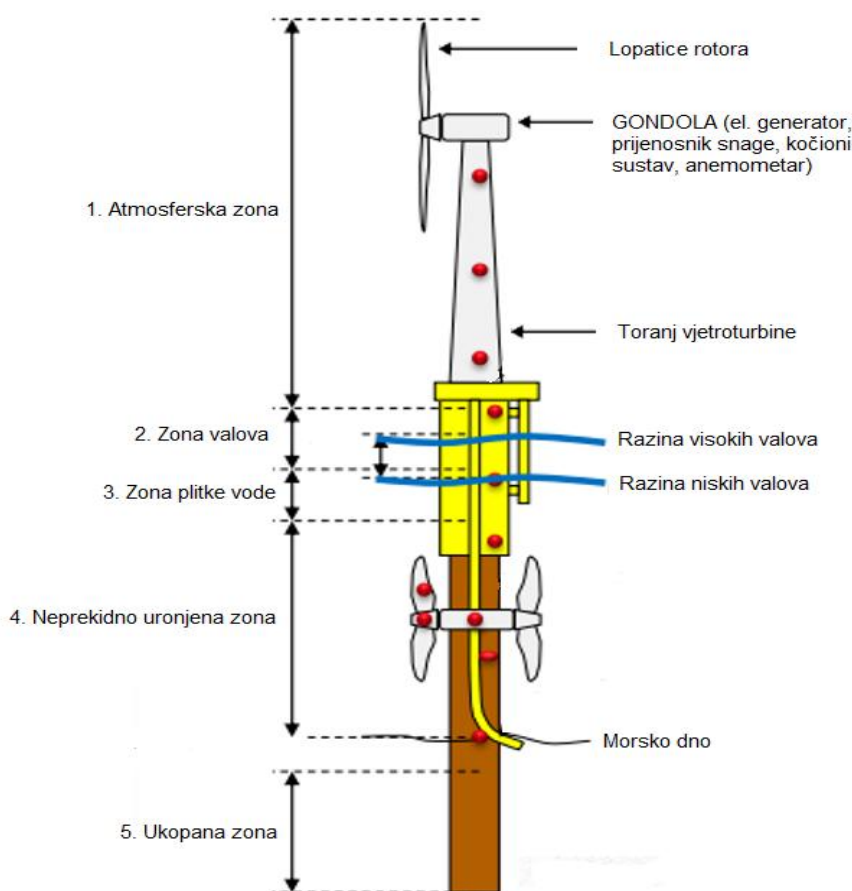
Premazi i sustavi premaza za zaštitu od korozije razvijani su posljednjih desetljeća te uz vrijedno iskustvo stečeno iz offshore industrije nafte i plina i najčešće se primjenjuju u kombinaciji dva do tri sloja epoksidnih prevlaka i poliuretana kao završnog sloja. Očekivani vijek vjetroturbina bez održavanja sustava za zaštitu od korozije je preko 15 godina [16].

5.2 Odabir sustava premaza

Opće preporuke za sustave premaza koji će se koristiti za eksploatacijske uvjete na moru (offshore) propisane su međunarodnim normama [17]:

- HRN EN ISO 12944 - korozivna zaštita čeličnih konstrukcija sustavima premaza,
- ISO 20340 – boje i lakovi – zahtjevi za zaštitne sustave premaza za offshore područja,
- NORSOK M 501 – priprema površine i zaštitne prevlake.

Konstrukciju vjetroturbine moguće je podijeliti na četiri zone: atmosferska zonu, zona valova, uronjenu (podvodnu) zonu i ukopanu zonu (morsko tlo). Slika 12 prikazuje podjelu konstrukcije vjetroturbine na zone od temelja do vrha gondole.



Slika 12. Prikaz vjetroturbine od temelja do gondole, [12]

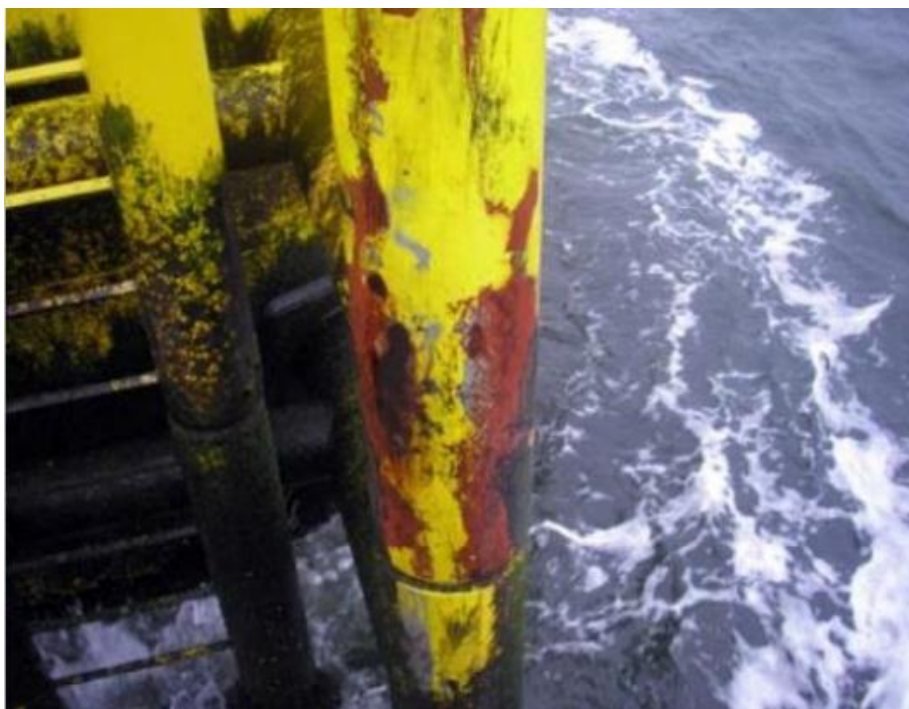
Prema normama HRN EN ISO 12944-5, ISO 20340 i NORSOK M 501 za **atmosferske okolišne uvjete** kojima su izložene vjetroturbine na moru prikazane su preporuke za odabir premaza u Tablici 2 [17] .

Tablica 2. Preporuka premaza za atmosfersko izlaganje vjetroturbine [17]

Norma	Temeljni premaz	Broj slojeva	Debljina suhog filma u μm
HRN EN ISO 12944 C5-M	EP, PUR	3 do 5	320
	EP, PUR	2	500
	EP, PUR (s cinkom)	4 do 5	320
ISO 20340 C5-M	EP (s cinkom)	Min. 3	>280
	EP	Min. 3	>350
NORSOK M 501	EP (s cinkom)	Min. 3	>280
	EP	Min. 2	>1000

Opis oznaka za Tablicu 2: EP- epokidni premaz; PUR- poliuretanski premaz; EP, PUR (s cinkom) - temeljni premaz obogaćen s min. 80% cinkovih čestica

Primjer pojave korozije u zoni valova prikazan je na Slici 13. Dijelovi **u zoni valova** izloženi su i pojavi mehaničkih oštećenja i trošenja od razni plutajućih predmeta, komada leda zimi itd.

**Slika 13. Mehanička oštećenja u zoni valova nastala od plutajućih predmeta [12]**

Prema HRN EN ISO 12944-5, ISO 20340 i NORSOK M 501 normama za dijelove konstrukcija koji **su uronjeni i koji se nalaze u zoni valova** prikazane su preporuke za odabir sustava premaza u Tablici 3 [17].

Tablica 3. Preporuka premaza za podvodnu zonu i zonu valova [17]

Norma	Temeljni premaz	Broj slojeva	Debljina suhog filma u μm
HRN EN ISO 12944 Im2	EP (s cinkom)	3 do 5	540
	EP, PUR	1 do 3	600
	EP	1	800
ISO 20340 Im2	EP, PUR (s cinkom)	Min. 3	>450
	EP, PUR	Min. 3	>450
	EP	Min. 3	>600
NORSOK M 501	EP	Min. 2	Min. 350 *

* Sustav za zaštitu premazima uvijek se primjenjuje u kombinaciji s katodnom zaštitnom.

Opis oznaka za Tablicu 3: EP- epokidni premaz; PUR- poliuretanski premaz; EP, PUR (s cinkom) - temeljni premaz obogaćen s min. 80% cinkovih čestica

5.3 Atmosferska okolina - čelični tornjevi vjetroelektrane

Općenito, vanjske površine čeličnih tornjeva vjetroturbina smještenih na moru su metalizirane i zaštićene troslojnim sustavom premaza. Unutar tornjeva najčešće se koriste samo sustavi premaza kao zaštita od korozije, osim u nižim dijelovima ili dijelovima gdje je povećana mogućnost doticaja morske vode gdje može i metalizacija biti uključena. Slika 14 prikazuje nosive konstrukcije vjetroturbina izložene atmosferskim djelovanjima.



Slika 14. Čelični tornjevi vjetroturbina [16]

Prema Mühlbergu [16, 18] u tablici 4 i tablici 5 u nastavku prikazani su Sustav (1) i Sustav (2) koji se često koriste za korozijsku zaštitu nadvodnih dijelova čeličnih stupova vjetroelektrana.

Tablica 4. Primjer sustava premaza, Sustav (1) [16]

Sustav 1		
Vrsta premaza:	Broj slojeva:	Debljina premaza:
Metalizacija (Zn / Al, 85/ 15)	1	60 do 100 µm
Epoksidni	2	100 do 120 µm
Poliuretanski	1	50 do 80 µm

Tablica 5. Primjer sustava premaza, Sustav (2) [16]

Sustav 2		
Vrsta premaza:	Broj slojeva:	Debljina premaza:
Epoksidni (s cinkom)	1	60 µm
Epoksidni	1	200 µm
Poliuretanski	1	60 µm

U tablici 4 prikazan je sustav koji se sastoji od četiri sloja nanašenih premaza. Na čeličnu konstrukciju nanešen je metalizirani sloj cinka u debljini od 60 do 100 µm kao prvi sloj. Zatim slijede dva sloja epoksidnog premaza debljine od 100 do 120 µm po sloju te kao završni sloj poliuretanski premaz u debljini od 50 do 80 µm.

Za usporedbu u tablici 5 prikazan je sustav koji se sastoji od tri sloja. Temeljni sloj je epoksidni premaz s cinkovim česticama u debljini od 60 µm. Drugi sloj kao međupremaz je epoksidni premaz u debljini od 200 µm te završni sloj poliuretanski premaz debljine 60 µm.

Debljine premaza podrazumjevaju se kao debljine mjerene nakon sušenja filma. Sustav (2) pronašao je veću primjenu iz više razloga [16]:

- Štedi se vrijeme za aplikaciju jednog sloja premaza,
- Nepotrebno je izvođenje metalizacije jer temeljni epoksidni premaz je obogaćen cinkom,
- Usporedivo je jeftiniji od sustava (1).

5.4 Podvodna zona - temeljna konstrukcija

Na uronjenim dijelovima tj. dijelovima temeljne konstrukcije vjetroturbine postoje mjesta (npr. džepovi, utori, procjepi) koja nisu uvijek lako dostupna te kao takva nisu u potpunosti zaštićena sustavom premaza. Takve strukture mogu se nalaziti u trajno uronjenoj zoni ili u zoni valova. Površine u trajno uronjenoj zoni zaštićuju se epoksidnim premazima u dva sloja po 200 do 250 μm no kako razni utori i procjepi ostaju nazaštićeni primjenjuje se katodna zaštita [16, 18].

Površine konstrukcija koje se nalaze u zoni valova zaštićuju se slijedećim sustavima (3) i (4) prikazano u tablicama 6 i 7 [16, 18].

Tablica 6. Primjer sustava premaza, Sustav (3) [16]

Sustav 3		
Vrsta premaza:	Broj slojeva:	Debljina premaza:
Epoksidni specijalni	2 do 3	200 do 250 μm
Poliuretanski	1	50 do 70 μm

Tablica 7. Primjer sustava premaza, Sustav (4) [16]

Sustav 4		
Vrsta premaza:	Broj slojeva:	Debljina premaza:
Epoksidni specijalni	2	500 μm
Poliuretanski	1	50 do 70 μm

Ovaj program od najmanje tri sloja osigurava izbjegavanje pojave pora, metalna površina je zaštićena od prodora vlage i agresivnih soli.

Unutar temeljnih konstrukcija vjetroagregata, područja koja nisu hermetički zatvorena zaštićena su epoksidnim premazima u dva sloja po 200 do 250 μm .

Na temeljnim konstrukcijama na uronjenom dijelu vjetroagregata iz konstrukcijskih razloga ostaju komore do kojih ne dopire voda ili zrak, ali je prilikom montaže i zavarivanja ostalo zarobljenog zraka, tj. kisika te takva atmosfera pogoduje razvoju korozije.

Stoga se u budućim projektima više pažnje posvećuje na zaštiti unutarnjih površina kako bi se smanjili povoljni uvjeti za nastanak korozije i time sačuvali temelji vjetroturbina [16].

5.5 Uspješna korozijska zaštita

Projektiranje sustava za zaštitu od korozije nije uvijek jamstvo uspješne zaštite od korozije jer mnogo je drugih faktora koji će biti odlučni za trajnost konstrukcije vjetroturbine. Mnoge pogreške će se zapravo dogoditi zbog pogrešne pripreme površine ili zbog pogrešne aplikacije boje. Analize štete su pokazale da su zbog pogrešne pripreme površine i/ili zbog pogrešne aplikacije boje povećani troškovi za 43 % do 68 % u industriji zaštitnih premaza [17, 18, 19]. Slika 15 prikazuje nekoliko nepravilno izvedenih zavora zbog kojih je došlo do pojave korozije.



Slika 15. Priprema rubova konstrukcijskih dijelova vjetroturbina [17]

Prema tome, bitno je osigurati da su površine koje treba zaštititi optimalno pripremljene za nanošenje premaza, uključujući i da su dostupne za apliciranje boje, što znači da su konstrukcijska rješenja navedena prema normi HRN EN ISO 12944-3 zadovoljena. Nadalje, preporuke ISO 8501-3 odnose se na pripremu zavora i rubove te ih treba uzeti u obzir. Nekoliko primjera pripreme zavora na konstrukciji temelja vjetroturbine prikazano je na slici 16, dva stupca s desne prikazuju nepravilno pripremljene zavare gdje je došlo do pojave korozije [17, 18, 19].

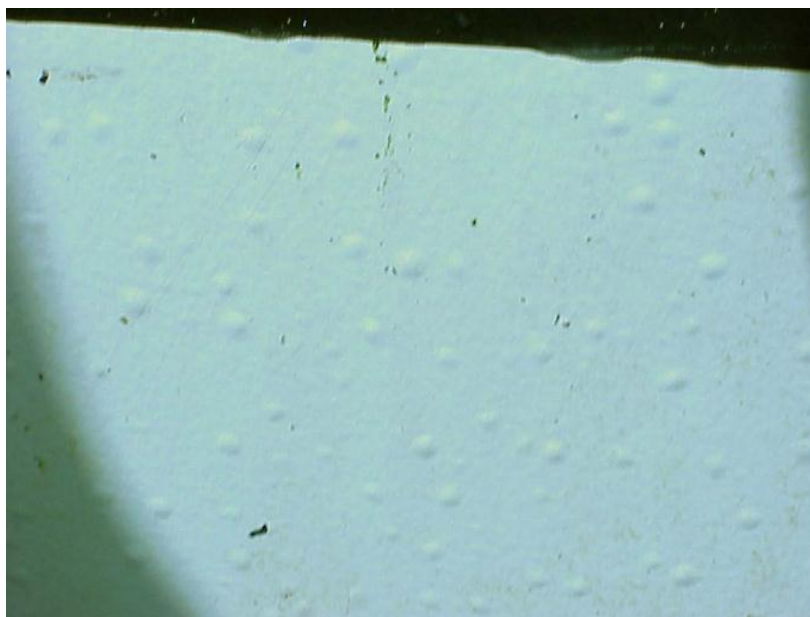


Slika 16. Priprema zavara konstrukcije vjetroelektrane za aplikaciju boje [17]

5.6 Neuspjeli slučajevi korozivne zaštite vjetroturbina

5.6.1 Specifikacija nedostataka

Na jednoj od prvih offshore vjetroelektrana, bio je primjenjen sustav zaštite koji se sastojao od jedne vrste premaza. Premaz je nanesen u dva sloja umjesto u tri do četiri sloja kao iz gore navedenih sustava (3) i (4). Premazi su nanešeni u isto vrijeme, tj. bez faze sušenja između nanošenja. No, iako je primjenjen epoksidni premaz, s vrlo dobrim antikorozivnim svojstvima, došlo je do pojave pora. Kroz pore je omogućen pristup vode i soli do metalne površine te je došlo do pojave bubrenja zaštitnog premaza nakon dvije do tri godine rada u eksploataciji (slika 17).



Slika 17. Bubrenje na površini [16]

Nakon 2 do 3 godine rada došlo je do ljuštenja mjehurića veličine 5 do 10 mm te je metalna površina direktno izložena korozivnim utjecajima [16].

Kao test je naknadno izveden sustav premaza (4). Pokazalo se kako je zaštita pravilno izvedenim sustavom premaza zadovoljavajuća.

5.6.2 Ljuštenja premaza s galvaniziranih čeličnih površina

Prema ISO 12944-2 nazaštićene galvanizirane površine u morskom okruženju korodiraju relativno brzo (do 8 μm na godinu). Zbog toga primjenjuje se kombinirana površinska zaštita s premazima. Takvi sustavi poznati su kao Duplex sustavi. Prepoznati su kao visokozaštitni sustavi od agresivne atmosferske korozije [16].

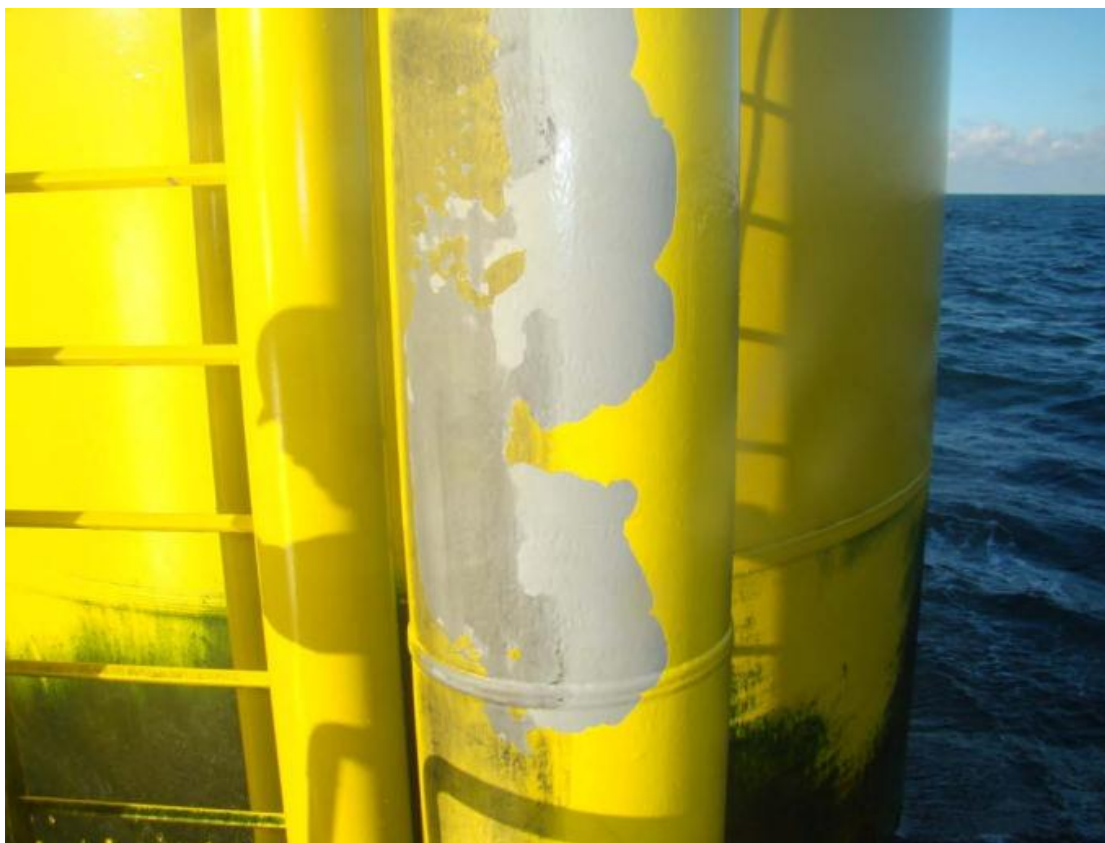
Konstrukcije poput ograda, ljestve, platforme i sl., na offshore vjetroeturinama bile su pocinčane, obojane i montirane. U roku od godinu dana došlo je do odvajanja površinskog sloja premaza ostavljajući samo galvanizirani sloj. Na većini površine je ostao premaz, ali je bilo lokalnih mjesta gdje se premaz odvojio, ponegdje su bile nezaštićene površine od 100 cm^2 .

Istraživanje je pokazalo da na galvanizirane površine nije nanesen odgovarajući premaz. Nedostajao je temeljni premaz sa svojstvima dobrog sidrenja tj. karakteristikama prijanjanja za galvaniziranu podlogu [16].

5.6.3 Ljuštenja završnog sloja

Na offshore vjetroturbinama završni sloj i njegov temeljni premaz odvaja se u području pristajanja brodova. Sustav premaza je gore navedeni sustav (3). Ljuštenje premaza se dogodio između drugog i trećeg temeljnog sloja. Šteta se javila tijekom pristajanja brodova (slika 18). Dijelovi svjetlosive boje odvojili su se netom prije snimanja fotografije dok su područja tamnosive boje otpala prije. Broj tornjeva s takvim greškama je 10% od ukupnog broja tornjeva vjetroparka. Analizom šteta ispostavilo se da je nastala šteta nastala zbog dva razloga [16, 18]:

- a) Nakon kemijske analize otkrivene su iznenađujuće velike količine aluminija i cinka na stražnjoj strani otpalog premaza. Premaz se odvojio zbog čestica cinka i aluminija koje su zaostale prilikom metalizacije te nisu odvojene naknadnom obradom. Prilikom pristajanja broda došlo je do mehaničkog oštećenja na lokalnoj površini zbog neodgovarajućeg prijanjanja sloja premaza na metaliziranoj površini.
- b) Na konstrukciju epoksidni premaz je nanešen u vodoravnom položaju te je zbog prekida u proizvodnji više od mjesec dana stajao na otvorenom. Kako je epoksidni sloj bio izložen UV svjetlu došlo je do pojave kredanja. Zbog toga površina nije bila glatka već kredasta zbog čega su oslabljene adhezijske sile između novog i starog sloja. Konstrukcija vjetroturbine je montirana u vertikalnom položaju te je prilikom kontakta broda i površine konstrukcije došlo do oštećenja tj. ljuštenja premaza.



Slika 18. Odvajanje završnog premaza na dijelu konstrukcije za pristajanje brodova [16]

5.6.4 Prevelika debljina suhog sloja

Epoksidne boje sadrže otapala te imaju gornju kritičnu debljinu nanošenja mokrog sloja. Ako se prekorači maksimalna granica mokrog sloja, unutar sloja se razvija naprezanje. Potrebno je pridržavati se preporučene debljine kako nebi prekoračili debljinu sloja jer prilikom izloženosti klimatskim i fizičkim utjecajima dolazi do pojave pukotina zaštitnog sloja gdje nastupa korozija (slika 19). Da bi spriječili pojavu pucanje premaza, potrebno je kontrolirati debljinu mokrog i suhog sloja nanesenog premaza [16,18].



Slika 19. Nastala pukotina premaza [16]

5.7 Primjena i razvoj novih sustava zaštite od korozije

Iz nekoliko prethodnih primjera vidljivo je koji su sustavi primjenjivi za zaštitu vjetrorlektrana na moru. Tako se npr. najčešće primjenjuju dupleks sustavi što znači za nadvodne dijelove i dijelove u zoni valova koristi se kombinacija zaštite metalizacijom i premazima, a za uronjene dijelove kombinacija zaštite premazima i katodnom zaštitom. Dupleks sustavi se danas najviše primjenjuju jer unatoč oštećenju površinskog premaza konstrukcija će biti šticea temeljnim metaliziranim slojem (metalizacija cinkom ili aluminijem ili kombinacijom Zn i Al) [19]. Važan čimbenik za planirani radni vijek je održavanje postojećih sustava zaštite na vjetroelektrana. Za obavljanje radova na popravku potrebni su pogodni vremenski uvjeti, more mora biti mirno, a aktivnost valova što manja. Za površine koje su uronjene popravak sustavom premaza nije moguć. Međutim, u takvoj okolini sustav katodne zaštite štiti od korozije. Potrebno je kontrolnim pregledima utvrditi stanje zaštitnog premaza na uronjenim dijelovima konstrukcije. Ako se utvrdi oštećenje premaza onda je potrebno provjeriti i učinkovitost katodne zaštite te održavati sustav katodne zaštite kako konstrukcija vjetroturbine nebi bila izložena ubrzanom djelovanju korozije [16].

Razvoj sustava za zaštitu od korozije na vjetroturbinama u velikom je porastu što je posljedica rasta industrije za preradu obnovljive energije. Epoksidni premazi s cinkovim česticama koja se nanose kao temeljni premazi su godinama u primjeni zbog dobrih antikorozijskih svojstava što su pokazala istraživanja. Najčešće se upotrebljavaju višeslojni sustavi premaza dok jednoslojni sustavi nisu nikako pogodni za korozivnu zaštitu konstrukcija eksploatiranim na moru. U kombinaciji s drugim metodama zaštite, poput katodne zaštite, višeslojni sustavi premaza pokazuju zadovoljavajuće rezultate. Područja konstrukcije na kojem su uočena mehanička oštećenja premaza (zona valova i pristajanje broda) štite se dupleks sustavom zaštite. Tendencija je dalje poboljšavati i razvijati sustave za zaštitu od korozije jer time se produljuje radni vijek vjetroturbina.

6. ZAKLJUČAK

Osiguranje najviše moguće kvalitete sustava premaza za zaštitu od korozije od izrazite je važnosti za doživotne troškove offshore projekata vjetroturbina. Ako se ispostave rane pogreške u procesu projektiranja sustava premaza za eksploataciju na moru, velika će biti vjerojatnost za dodatnim i višestruko većim troškovima održavanja te popravcima. Pri kvalitetnom projektiranju potrebno je izbjegavati konstrukcijske pogreške te omogućiti što jednostavnije i kvalitetnije nanošenje premaza, a sve u svrhu smanjenja dugoročnih troškova. Potrebno je razraditi i pažljivo birati sustave za zaštitu korozije premazima, pratiti ponudu tržišta jer novim tehnologijama i razvojem teži se poboljšanju kvalitete. Premazi moraju izdržati i zaštititi konstrukciju od vlage s visokom slanoćom, od izloženosti UV svjetlu, od naglih promjena temperatura, kao i plimne valove. Razvoj i poboljšanje djelovanja novih premaza doprinjet će poboljšanju zaštite od korozije, ali će se suočiti s izazovima poput brige za okoliš i razvojem ekološki prihvatljivih premaza.

7. LITERATURA

- [1] http://www.izvorienergije.com/energija_vjetra.html, (dostupno 15.08.2013.)
- [2] <http://www.vjetroelektrane.com/moderni-vjetroatregati-i-pretvorba-energije>, (dostupno 15.08.2013.)
- [3] http://www.izvorienergije.com/energija_vjetra_usporedba_eu_sad.html, (dostupno 15.08.2013.)
- [4] <http://www.izvorienergije.com>, (dostupno 15.08.2013.)
- [5] Esih I.: Osnove površinske zaštite, FSB, Zagreb, 2003.
- [6] Munger C.G.: Corrosion prevention by Protective Coatings, NACE, Houston, 1999.
- [7] Barnhart, R.: How Coatings Protect Steel, Journal of Protective Coatings & Linings, **67**, 2013.
- [8] http://www.astm.org/SNEWS/APRIL_2006/dallynside_apr06.htm, (dostupno 20.08.2013.)
- [9] Kalendova, A.: Effects of non-isometric pigment in organic coatings for corrosion protection, Emerald (<http://www.emeraldinsight.com>), 2000.
- [10] Caprari J.J., Di Sardi A.R., del Amo B.: Zink as corrosion inhibitive pigment used in coats for steel protection, Pigments and Resin Tehnology, **29**, 2000.
- [11] R.E. Sheppard: Inspection Guidance for Offshore Wind Turbine Facilities, Energo Engineering, 2010.
- [12] Harald van der Mijle Meijer: Cost effective ocean energy, TNO Inovation for life, **10**, Nizozemska, 2013.
- [13] Harald van der Mijle Meijer: Corrosion in offshore wind energy, Essential innovations, **5**, Nizozemska, 2009.
- [14] Ge Yan, Zhu Xi-chang, Yan Li. Anti-corrosion protection strategies for support structures and foundations of wind turbines of offshore wind farms, International

conference on sustainable power generation and supply (SUPERGEN),
Nanjing, Kina, 2009.

[15]

<http://www.renovablesmadeinspain.com/noticia/pagid/128/titulo/GWEC%20pronostica%20que%20la%20e%C3%B3lica%20seguir%C3%A1%20creciendo/len/en/>,
(dostupno 19.09.2013.)

[16] A. R. Black, P. K. Nielsen: Corrosion protection of offshore wind farm structures – present understanding and future challenges, prezentacija EUROCORR, Stockholm, Švedska, 2011.

[17] Karsten Mühlberg: HEMPEL, Corrosion Protection of offshore wind turbines, 2010.

[18] Karsten Mühlberg: Hempel, Corrosion Protection of Offshore Wind Turbines - A Challenge for the Steel Builder and Paint Applicator, Njemačka, 2009.

[19] Momber A.W., Plagemann P., Schneider .: Investigating Corrosion Protection of Offshore Wind Towers, Njemačka, 2008.

U PRILOGU:

- **CD-R disc**